



Attorney Docket No.: 8013-1174

PATENT

IN THE U.S. PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant: Yoshiyuki YAKABE  
Appl. No.: 10/606,773  
Filed: June 27, 2003  
For: OPTICAL AMPLIFIER AND OPTICAL FIBER  
LASER

L E T T E R

Assistant Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450  
Alexandria, Virginia 22313-1450

Date: October 1, 2003

Sir:

Under the provisions of 35 U.S.C. § 119 and 37 C.F.R. § 1.55(a), the applicant(s) hereby claim(s) the right of priority based on the following application(s):

<u>Country</u>	<u>Application No.</u>	<u>Filed</u>
JAPAN	2002-187988	June 27, 2002

A certified copy of the above-noted application(s) is(are) attached hereto.

If necessary, the Commissioner is hereby authorized in this, concurrent, and future replies, to charge payment or credit any overpayment to Deposit Account No. 25-0120 for any additional fee required under 37 C.F.R. §§ 1.16 or 1.17; particularly, extension of time fees.

Respectfully submitted,

YOUNG & THOMPSON

By

Benoît Castel  
Benoît Castel, #35,041

BC/psf

745 South 23<sup>rd</sup> Street, Suite 200  
Arlington, Virginia 22202  
(703) 521-2297

Attachment

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

US

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2002年 6月27日

出 願 番 号

Application Number:

特願2002-187988

[ST.10/C]:

[JP2002-187988]

出 願 人

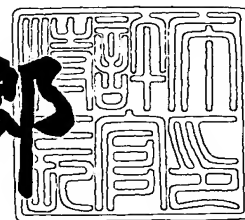
Applicant(s):

日本電気株式会社

2003年 2月25日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

太田信一郎



出証番号 出証特2003-3010866

【書類名】 特許願

【整理番号】 33509936

【提出日】 平成14年 6月27日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 H01S 3/00

【発明者】

    【住所又は居所】 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

    【氏名】 矢ヶ部 喜行

【特許出願人】

    【識別番号】 000004237

    【氏名又は名称】 日本電気株式会社

【代理人】

    【識別番号】 100088328

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 金田 暢之

    【電話番号】 03-3585-1882

【選任した代理人】

    【識別番号】 100106297

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 伊藤 克博

【選任した代理人】

    【識別番号】 100106138

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 石橋 政幸

【手数料の表示】

    【予納台帳番号】 089681

    【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

    【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9710078

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 レーザ増幅器、および光ファイバレーザ

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 増幅対象の信号光を伝搬する増幅媒体であって、基底準位と、レーザ上準位と、前記基底準位と異なるレーザ下準位とに加えて、前記レーザ上準位と前記レーザ下準位間の遷移により発生した蛍光を吸収する、励起状態吸収上準位と励起状態吸収下準位との対を有し、該励起状態吸収下準位は、前記基底準位と前記レーザ上準位との間に位置し、かつ前記基底準位と前記レーザ上準位と前記レーザ下準位とのいずれとも一致しないエネルギー準位構造を有する希土類元素イオンが添加された増幅媒体と、

前記増幅媒体に導入される励起光によって前記増幅媒体に添加された前記希土類元素イオンを励起し、前記レーザ上準位と前記レーザ下準位との間に反転分布を形成する第 1 の励起手段と、

前記増幅媒体に導入される、前記第 1 の励起手段を構成する前記励起光の波長とは異なる波長を有する励起光によって、前記励起状態吸収下準位に存在する前記希土類元素イオンを前記レーザ上準位もしくは前記レーザ上準位よりも上位の準位に励起する第 2 の励起手段とを有するレーザ増幅器。

【請求項 2】 前記希土類元素イオンはエルビウムイオンである、請求項 1 に記載のレーザ増幅器。

【請求項 3】 前記増幅媒体の母材はフルオロジルコン酸塩ガラスであり、前記希土類元素イオンは前記フルオロジルコン酸塩ガラスに添加されている、請求項 1 または 2 に記載のレーザ増幅器。

【請求項 4】 前記増幅媒体はファイバ導波路形状に形成されている、請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載のレーザ増幅器。

【請求項 5】 前記レーザ上準位は $^4S_{3/2}$ または $^2H_{11/2}$ であり、前記レーザ下準位は $^4I_{9/2}$ であり、前記励起状態吸収下準位は $^4I_{13/2}$ である、請求項 2 から 4 のいずれか 1 項に記載のレーザ増幅器。

【請求項 6】 前記第 1 の励起手段を構成する励起光の波長は 960～985 nm であり、前記第 2 の励起手段を構成する励起光の波長は 780～790 nm

mである、請求項5に記載のレーザ増幅器。

【請求項7】 前記第1の励起手段を構成する励起光の波長は795～805nmであり、前記第2の励起手段を構成する励起光の波長は780～790nmである、請求項5に記載のレーザ増幅器。

【請求項8】 前記増幅媒体、前記第1の励起手段、および前記第2の励起手段によって構成される増幅ユニットを複数備え、該各増幅ユニットが直列に接続されている、請求項5から7のいずれか1項に記載のレーザ増幅器。

【請求項9】 前記各増幅ユニット同士の間には波長500nm以上560nm以下の範囲の光と波長820nm以上860nm以下の範囲の光のうちの少なくとも一方の光を遮断する素子が設置されている、請求項8に記載のレーザ増幅器。

【請求項10】 前記第1の励起手段と前記第2の励起手段に加えて、 $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 遷移断面積 $s_1$  (cm<sup>2</sup>) と $^4I_{13/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$ 遷移断面積 $s_2$  (cm<sup>2</sup>) との比 $s_1/s_2$ が0.2以上2.2以下となる波長の光を前記増幅媒体に入射する手段を有する、請求項5から9のいずれか1項に記載のレーザ増幅器。

【請求項11】 前記増幅媒体に添加される前記エルビウムイオンの濃度をD (ppm) とし、前記増幅媒体と前記励起光との相互作用長をL (m) とし、前記増幅媒体と前記励起光との相互作用断面積をS (μm<sup>2</sup>) とし、前記増幅媒体に入射される前記励起光の合計パワーをP (mW) とした場合に、 $D \cdot L / (S \cdot P)$  の値が1以上10以下の範囲となるように構成されている、請求項2から10のいずれか1項に記載のレーザ増幅器。

【請求項12】 基底準位と、レーザ上準位と、前記基底準位と異なるレーザ下準位とに加えて、前記レーザ上準位と前記レーザ下準位間の遷移により発生した蛍光を吸収する、励起状態吸収上準位と励起状態吸収下準位との対を有し、該励起状態吸収下準位は、前記基底準位と前記レーザ上準位との間に位置し、かつ前記基底準位と前記レーザ上準位と前記レーザ下準位とのいずれとも一致しないエネルギー準位構造を有する希土類元素イオンが添加された増幅媒体と、

前記増幅媒体に導入される、単一の波長もしくは複数の波長からなる励起光によって、前記増幅媒体に添加された前記希土類元素イオンを励起し、前記レーザ

上準位と前記レーザ下準位との間に反転分布を形成する第 1 の励起手段と、

前記増幅媒体に導入される、前記第 1 の励起手段を構成する前記励起光の波長とは異なる波長を有する励起光によって、前記励起状態吸収下準位に存在する前記希土類元素イオンを前記レーザ上準位もしくは前記レーザ上準位よりも上位の準位に励起する第 2 の励起手段とを有し、

前記増幅媒体は、母材がフルオロジルコン酸塩ガラスからなり、前記希土類元素イオンとしてエルビウムイオンを前記フルオロジルコン酸塩ガラスに含んでおり、ファイバ導波路形状に形成されている、光ファイバレーザ。

【請求項 1 3】 前記レーザ上準位は $^4S_{3/2}$ または $^2H_{11/2}$ であり、前記レーザ下準位は $^4I_{9/2}$ であり、前記励起状態吸収下準位は $^4I_{13/2}$ である、請求項 1 2 に記載の光ファイバレーザ。

【請求項 1 4】 前記第 1 の励起手段を構成する励起光の波長は 9 6 0 ～ 9 8 5 n m であり、前記第 2 の励起手段を構成する励起光の波長は 7 8 0 ～ 7 9 0 n m である、請求項 1 3 に記載の光ファイバレーザ。

【請求項 1 5】 前記第 1 の励起手段を構成する励起光の波長は 7 9 5 ～ 8 0 5 n m であり、前記第 2 の励起手段を構成する励起光の波長は 7 8 0 ～ 7 9 0 n m である、請求項 1 3 に記載の光ファイバレーザ。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、レーザ光を増幅するレーザ増幅器等に関し、特に、増幅媒体中を伝搬するレーザ光を高利得で増幅するレーザ増幅器等に関する。

【0 0 0 2】

【従来の技術】

近年では、大容量の光通信を行うにあたって波長多重伝送技術が重要な技術になっている。現在の光通信では、光信号の伝搬媒体として、石英系ガラスからなる光ファイバが広く用いられている。現在では、石英系ガラスファイバの低損失帯域（波長 1 4 5 0 n m ～ 1 6 5 0 n m）のうち、 $Er^{3+}$  添加ファイバ光増幅器（E r b i u m D o p e d F i b e r A m p l i f i e r : 以下、「EDF

A」という。)により光増幅が可能である、1530～1560nm帯(C-Band)、1570～1610nm帯(L-Band)の光が光通信に利用されている。将来における総伝送容量の増大に対応するためには伝送帯域の拡大が期待されており、特に、C-Band、L-Bandに次ぐ低損失帯域である1650nm帯の伝送帯域が注目されている。

## 【0003】

しかし、既存のEDFAは、増幅帯域が長波側で1610nm程度に限られている。これは、 $\text{Er}^{3+}$ イオンの $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ の誘導放出遷移(図1中の符号gを参照)により増幅を行っている既存のEDFAにおいて、波長1610nm以上の信号光に、 $^4\text{I}_{13/2}$ 準位のイオンにより吸収される信号光励起状態吸収(Signal Excited State Absorption (Signal ESA) : 以下、「信号光ESA」という。図1中の符号fを参照)が発生し、利得が減少するからである。このことは、増幅に関与するレーザ上準位と信号光ESAの下準位とが同一であるために避けられない。

## 【0004】

一方、1650nm帯の光増幅器として、以下に挙げるようないくつかの報告例がある。しかしながら、効率や利得、ファイバ作製の容易さ、信頼性等の点で、実用可能な光増幅器は報告されていない。

## 【0005】

1650nm帯の光増幅器の一報告例としては、「アイ・イー・イー・イー、フォトニクス・テクノロジー・レターズ、第8巻第3号、349-351頁(1996年)」に記載された、トリウムイオン( $\text{Tm}^{3+}$ )添加フッ化物ガラスファイバ増幅器がある。この報告例では、本来、 $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 誘導放出遷移のもつ波長1.85 $\mu\text{m}$ 近辺のピーク部分を、クラッド部分に添加したテルビウム(Tb)により吸収させることで、この遷移の短波側の裾野である1650nm帯における誘導放出のみを残し、25dB以上の利得を波長1650～1670nmにおいて達成している。この技術に関しては、特開平8-152531号公報により詳しく記載されている。

## 【0006】



上記の文献に記載された光増幅器は、その構成が未最適であることを考慮しても、増幅効率は0.22%と低い。さらに、上記の文献では、雑音指数については報告がなされていない。また、上記文献の光増幅器は、クラッドに余分な添加物(Tb)を導入すること、発光エネルギーの大部分がTbイオンに吸収されて失われることなどから、総合的な光/光変換効率は従来のEDFAに比べて非常に低いと考えられ、原理実証を行ったレベルに留まっている。

## 【0007】

また、「アイ・イー・イー・イー、フォトニクス・テクノロジー・レターズ、第2巻第6号、422-424頁(1990年)」には、ツリウムを添加した石英ガラスファイバにおいて、利得2dBを波長1.69 $\mu$ mにおいて実現した例が記載されている。しかし、この程度の利得では、実際の通信システムにおける中継増幅器の要求性能を満たすにはほど遠い。

## 【0008】

その他、プラセオジウム(Pr)を添加したカルコゲナイトガラスにおける1650nm帯増幅シミュレーション(欧州光通信国際会議、ECOC2000、ポストデットドライン論文PD-1)や、ラマン増幅(2000年電子情報通信学会通信ソサイエティ学会論文番号B-10-114)を用いたものも提案されているが、未だ実用的な増幅器は開発されていない。

## 【0009】

一方、「アイ・イー・イー、エレクトロニクス・レターズ、第26巻第10号649-651頁(1990年)」によると、フッ化物ガラス中のエルビウムイオンの $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 遷移、あるいは $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 遷移による発光スペクトルが、図16の蛍光スペクトルに示すように、1620~1720nmに広がるスペクトルを有することが知られている。なお、( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ )の2つの準位は、エネルギー差が約830 $cm^{-1}$ であり、常温の熱エネルギー(210 $cm^{-1}$ )により熱的に強く結合していると考えられている。以下では、 $^4S_{3/2}$ と $^2H_{11/2}$ を結合した1つの準位とみなす場合、( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ )と記すこととする。

## 【0010】

また、 $^4S_{3/2}$ 準位に励起されたエルビウムイオンの $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 自然放出遷移確率および $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 自然放出遷移（図1中の符号cを参照）確率は、それぞれ、 $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 自然放出遷移確率の18倍および7倍程度と高い。このときに放出される光の波長は、それぞれ550nm付近、850nm付近である。例えば、「アイ・イー・イー・イー・エレクトロニクス・レターズ、第27巻20号、1785-1786頁（1991年）」では、801nm単一波長励起による、 $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 遷移の発光を利用した546nmのレーザ発振が報告されている。さらに、「アイ・イー・イー・イー・エレクトロニクス・レターズ、第27巻2号、184-186頁（1991年）」では、801nm単一波長励起による $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 遷移の発光を用いた850nm帯増幅器が報告されている。

## 【0011】

さらに、「アイ・イー・イー・イー・エレクトロニクス・レターズ、第31巻5号、373-374頁（1995）」によると、エルビウムイオンの $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 遷移による波長2.7 $\mu$ mのレーザ光の研究が報告されている。この報告によれば、波長2.7 $\mu$ mのレーザ光の発振と同時に、波長2.7 $\mu$ mのレーザ光の発振を補助する目的で、波長1.7 $\mu$ mのレーザ光の発振が行われている。

## 【0012】

## 【発明が解決しようとする課題】

既存のEDFAは、前述のとおり、長波長側の増幅帯域が1610nm程度に制限される。

## 【0013】

また、Er<sup>3+</sup>イオンの( $^2H_{11/2}$ ,  $^4S_{3/2}$ )  $\rightarrow$   $^4I_{9/2}$ の誘導放出遷移により、1650nm帯の信号光の増幅を行う場合、Er<sup>3+</sup>イオンの $^4I_{13/2}$ 準位（励起状態吸収下準位）の寿命が10msと長く、イオンが停滞しやすいため、この準位のイオンを脱励起する何らかの工夫を施さないと、信号光ESAによって利得が減少する。

## 【0014】

また、計算によると、 $(^2\text{H}_{11/2}, ^4\text{S}_{3/2})$  準位に蓄えられたエネルギーのうちの50%程度が、 $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  遷移による550nm帯の自然放出光や、 $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$  遷移による850nm帯の自然放出光により全方位角に放射されて失われてしまうため、増幅器の効率を低下させると考えられる。

## 【0015】

さらに、ファイバ型増幅器を構成した場合、一部の自然放出光は、増幅ファイバ中を伝搬するに従って増幅される。増幅された自然放出光はASE (Amplified Spontaneous Emission) と呼ばれる。このようなASEは、 $(^2\text{H}_{11/2}, ^4\text{S}_{3/2}) \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$  遷移による1650nm帯の光増幅を阻害し、高利得が得られない原因となる。

## 【0016】

本発明は上記のような問題点に鑑みてなされたものであり、本発明の目的は、信号光が励起状態吸収下準位の希土類元素イオンによって吸収されるという信号光励起状態吸収の発生を抑え、信号光の増幅利得および増幅効率を高めることができるレーザ増幅器等を提供することにある。

## 【0017】

また、本発明の他の目的は、波長1650nm帯において高利得のレーザ増幅を得ることができるレーザ増幅器等を提供することにある。

## 【0018】

## 【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するため、本発明のレーザ増幅器は、増幅対象の信号光を伝搬する増幅媒体であって、基底準位と、レーザ上準位と、前記基底準位と異なるレーザ下準位とに加えて、前記レーザ上準位と前記レーザ下準位間の遷移により発生した蛍光を吸収する、励起状態吸収上準位と励起状態吸収下準位との対を有し、該励起状態吸収下準位は、前記基底準位と前記レーザ上準位との間に位置し、かつ前記基底準位と前記レーザ上準位と前記レーザ下準位とのいずれとも一致しないエネルギー準位構造を有する希土類元素イオンが添加された増幅媒体と、前記増幅媒体に導入される励起光によって前記増幅媒体に添加された前記希土類元素イオンを励起し、前記レーザ上準位と前記レーザ下準位との間に反転分布を形

成する第 1 の励起手段と、前記増幅媒体に導入される、前記第 1 の励起手段を構成する前記励起光の波長とは異なる波長を有する励起光によって、前記励起状態吸収下準位に存在する前記希土類元素イオンを前記レーザ上準位もしくは前記レーザ上準位よりも上位の準位に励起する第 2 の励起手段とを有する。

## 【 0 0 1 9 】

上記本発明のレーザ増幅器によれば、第 1 の励起手段によって増幅媒体に添加された希土類元素イオンが励起されてレーザ上準位とレーザ下準位との間に反転分布が形成され、第 2 の励起手段によって励起状態吸収下準位に存在する希土類元素イオンがレーザ上準位もしくはレーザ上準位よりも上位の準位に励起されるので、信号光が励起状態吸収下準位の希土類元素イオンによって吸収されるという信号光励起状態吸収（信号光 E S A）の発生が抑えられることから、信号光の増幅利得および増幅効率を高めることができる。

## 【 0 0 2 0 】

さらに、前記希土類元素イオンはエルビウムイオンである構成としてもよく、さらには、前記増幅媒体の母材はフルオロジルコン酸塩ガラスであり、前記希土類元素イオンは前記フルオロジルコン酸塩ガラスに添加されている構成としてもよい。加えて、前記増幅媒体はファイバ導波路形状に形成されている構成としてもよい。

## 【 0 0 2 1 】

この場合、前記レーザ上準位は $^4S_{3/2}$ または $^2H_{11/2}$ であり、前記レーザ下準位は $^4I_{9/2}$ であり、前記励起状態吸収下準位は $^4I_{13/2}$ であることが好ましい。

## 【 0 0 2 2 】

さらにこの場合には、前記第 1 の励起手段を構成する励起光の波長は 9 6 0 ～ 9 8 5 n m であり、前記第 2 の励起手段を構成する励起光の波長は 7 8 0 ～ 7 9 0 n m である構成とすることが好ましい。あるいは、前記第 1 の励起手段を構成する励起光の波長は 7 9 5 ～ 8 0 5 n m であり、前記第 2 の励起手段を構成する励起光の波長は 7 8 0 ～ 7 9 0 n m である構成とすることが好ましい。第 1 および第 2 の励起手段の各励起光の波長範囲をこれらのような範囲とすることにより、希土類元素イオンであるエルビウムイオンを高い効率で励起することができ、

波長 1 6 5 0 n m 帯のレーザ光を良好に増幅することができる。

【 0 0 2 3 】

また、前記増幅媒体、前記第 1 の励起手段、および前記第 2 の励起手段によって構成される増幅ユニットを複数備え、該各増幅ユニットが直列に接続されている構成としてもよい。通常は、1 つの励起光源から得られる励起光のパワーは有限であり、増幅媒体の長さに応じて励起光のパワーを増加させることには限界があるが、上記構成のように複数の増幅ユニットを直列に接続することにより、励起光パワーを無駄なく活用して信号光を段階的に増幅することができ、高利得化および高効率化を図ることができる。

【 0 0 2 4 】

加えて、前記各増幅ユニット同士の間には波長 5 0 0 n m 以上 5 6 0 n m 以下の範囲の光と波長 8 2 0 n m 以上 8 6 0 n m 以下の範囲の光のうちの少なくとも一方の光を遮断する素子が設置されている構成としてもよい。本発明により増幅しようとする波長 1 6 5 0 n m 帯の光は、エルビウムイオンの  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  遷移による 5 5 0 n m 帯の自然放出光や、 $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  遷移による 8 5 0 n m 帯の自然放出光によって、その増幅が抑制されてしまう。しかし、上記構成の素子を各増幅ユニットの間に設置することにより、上記のような自然放出光が次段の増幅媒体で過剰に増幅されることが防止されることから、レーザ増幅器の高利得化とエネルギー変換効率の高効率化を図ることが可能になる。

【 0 0 2 5 】

さらに、前記第 1 の励起手段と前記第 2 の励起手段に加えて、 $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  遷移断面積  $s_1$  (c m<sup>2</sup>) と  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$  遷移断面積  $s_2$  (c m<sup>2</sup>) との比  $s_1 / s_2$  が 0. 2 以上 2. 2 以下となる波長の光を前記増幅媒体に入射する手段を有する構成としてもよい。利得増強光として作用するこのような波長の光を増幅媒体に入射することにより、それを入射させない場合に比べて光／光変換効率を 1. 5 倍以上に向上することが可能になる。

【 0 0 2 6 】

また、前記増幅媒体に添加される前記エルビウムイオンの濃度を D (p p m) とし、前記増幅媒体と前記励起光との相互作用長を L (m) とし、前記増幅媒体

と前記励起光との相互作用断面積を  $S$  ( $\mu\text{m}^2$ ) とし、前記増幅媒体に入射される前記励起光の合計パワーを  $P$  (mW) とした場合に、 $D \cdot L / (S \cdot P)$  の値が 1 以上 10 以下の範囲となるように構成されていることが好ましい。

## 【0027】

また、本発明の光ファイバレーザは、基底準位と、レーザ上準位と、前記基底準位と異なるレーザ下準位とに加えて、前記レーザ上準位と前記レーザ下準位間の遷移により発生した蛍光を吸収する、励起状態吸収上準位と励起状態吸収下準位との対を有し、該励起状態吸収下準位は、前記基底準位と前記レーザ上準位との間に位置し、かつ前記基底準位と前記レーザ上準位と前記レーザ下準位とのいずれとも一致しないエネルギー準位構造を有する希土類元素イオンが添加された増幅媒体と、前記増幅媒体に導入される励起光によって前記増幅媒体に添加された前記希土類元素イオンを励起し、前記レーザ上準位と前記レーザ下準位との間に反転分布を形成する第 1 の励起手段と、前記増幅媒体に導入される、前記第 1 の励起手段を構成する前記励起光の波長とは異なる波長を有する励起光によって、前記励起状態吸収下準位に存在する前記希土類元素イオンを前記レーザ上準位もしくは前記レーザ上準位よりも上位の準位に励起する第 2 の励起手段とを有し、前記増幅媒体は、母材がフルオロジルコン酸塩ガラスからなり、前記希土類元素イオンとしてエルビウムイオンを前記フルオロジルコン酸塩ガラスに含んでおり、ファイバ導波路形状に形成されている。

## 【0028】

前記レーザ上準位は  $^4\text{S}_{3/2}$  または  $^2\text{H}_{11/2}$  であり、前記レーザ下準位は  $^4\text{I}_{9/2}$  であり、前記励起状態吸収下準位は  $^4\text{I}_{13/2}$  であることが好ましい。

## 【0029】

この場合、前記第 1 の励起手段を構成する励起光の波長は 960～985 nm であり、前記第 2 の励起手段を構成する励起光の波長は 780～790 nm である構成とすることが好ましい。あるいは、前記第 1 の励起手段を構成する励起光の波長は 795～805 nm であり、前記第 2 の励起手段を構成する励起光の波長は 780～790 nm である構成とすることが好ましい。

## 【0030】

## 【発明の実施の形態】

次に、本発明の実施形態について図面を参照して説明する。

## 【0031】

## (第1の実施形態)

図1は、エルビウムエネルギー準位図であり、第1の励起手段を構成するレーザ光（励起光）による遷移（ $a$ ,  $a'$ ,  $a''$ ）、第2の励起手段を構成するレーザ光（励起光）による遷移（ $b$ ,  $b'$ ,  $b''$ ）、および1620～1720nm帯発光遷移である（ $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ ） $\rightarrow$  $^4I_{9/2}$ 遷移（ $d$ ,  $e$ ）を明示している。また、図1に示すように、希土類元素イオンの1つであるエルビウムイオンは、基底準位（ $^4I_{15/2}$ ）と、レーザ上準位（ $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ ）と、基底準位と異なるレーザ下準位（ $^4I_{9/2}$ ）とに加えて、レーザ上準位とレーザ下準位との間の遷移により発生した蛍光を吸収する、励起状態吸収上準位（ $^4I_{9/2}$ ）と励起状態吸収下準位（ $^4I_{13/2}$ ）との対を有するエネルギー準位構造を有している。励起状態吸収下準位は、基底準位とレーザ上準位との間に位置し、かつ基底準位とレーザ上準位とレーザ下準位とのいずれとも一致しない。

## 【0032】

図2は、本発明の第1の実施形態に係るレーザ増幅器を示す概略構成図である。

## 【0033】

図2に示すように、本実施形態のレーザ増幅器は、信号光を出射する信号光源10と、第1の励起光源2から出射された励起光をその信号光に合波させる第1の波長多重合波器3と、その信号光に、第2の励起光源4から出射された励起光をさらに合波させる第2の波長多重合波器5と、信号光を増幅させる増幅媒体である増幅ファイバ1とを有している。信号光源10は、出射する信号光の波長が可変である。また、信号光源10と第1の波長多重合波器3との間と、増幅ファイバ1の出射端側には、戻り光による意図しないレーザ発振を抑制するために光アイソレータ8がそれぞれ設けられている。

## 【0034】

増幅ファイバ1は、母材がフルオロジルコン酸塩ガラスからなり、エルビウム

イオン ( $\text{Er}^{3+}$ ) が添加されており、ファイバ導波路形状に形成されている。この増幅ファイバ 1 は、添加されたエルビウムの濃度が 2000 ppm、コア径が 4.4  $\mu\text{m}$ 、長さが 5.2 m である。

## 【0035】

第 1 の励起光源 2 は、第 1 の励起手段として、基底状態吸収、もしくは基底状態吸収と励起状態吸収により、増幅上準位の  $^4\text{S}_{3/2}$ 、 $^2\text{H}_{11/2}$  かそれ以上の準位の  $^4\text{F}_{7/2}$  にエルビウムイオン（以下、単に「イオン」という。）を励起し、( $^4\text{S}_{3/2}$ 、 $^2\text{H}_{11/2}$ ) と  $^4\text{I}_{9/2}$  間に反転分布を形成できる波長を有するレーザ光を出射することができる。このような波長を有するレーザ光としては、例えば、530 nm 帯 (510~550 nm)、800 nm 帯 (780~810 nm)、および 970 nm 帯 (960~985 nm) の波長のレーザ光を利用することが可能である。これらの帯域のレーザ光により、図 1 の a (530 nm 帯励起光)、a' (970 nm 帯励起光)、a'' (800 nm 帯励起光) に示す遷移を経て、レーザ上準位の ( $^4\text{S}_{3/2}$ 、 $^2\text{H}_{11/2}$ ) とレーザ下準位の  $^4\text{I}_{9/2}$  との間に反転分布を形成する (a'' を示す波線矢印は、多フォノン緩和による遷移を表している)。

## 【0036】

一方、第 2 の励起光源 4 は、第 2 の励起手段として、 $^4\text{I}_{13/2}$  準位のイオンを、 $^4\text{S}_{3/2}$  準位かそれ以上の準位に励起する波長を有するレーザ光を出射することができる。このような波長を有するレーザ光としては、例えば、720 nm 帯 (710~730 nm)、800 nm 帯 (780~810 nm)、および 850 nm 帯 (830~870 nm) の波長のレーザ光が利用可能である。これらの帯域のレーザ光は、それぞれ図 1 の b (850 nm 帯励起光)、b' (800 nm 帯励起光)、b'' (720 nm 帯励起光) に示す遷移により、 $^4\text{I}_{13/2}$  準位のイオンを、それぞれ  $^4\text{S}_{3/2}$  準位、 $^2\text{H}_{11/2}$  準位、 $^4\text{F}_{7/2}$  準位に励起する。

## 【0037】

本実施の形態では、第 1 の励起手段の波長として、530 nm 帯 (510~550 nm)、800 nm 帯 (780~810 nm)、970 nm 帯 (960~985 nm) の何れか一つを、第 2 の励起手段の波長として 720 nm 帯 (710



～730 nm)、800 nm帯(780～810 nm)、850 nm帯(830～870 nm)の何れか一つを選択した波長の組み合わせが考えられる。

# 【0038】

次に、第1の励起手段、第2の励起手段で用いる好ましい波長について以下に説明する。

# 【0039】

図1に示すように、第1の励起光源に用いる波長によって基底準位( $^4I_{15/2}$ )からレーザ上準位( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ )までイオンが遷移する経路が異なっている。530 nm帯の励起光に励起される場合には図1中のaの経路を辿って遷移し、970 nm帯の励起光に励起される場合には図1中のa'の経路を辿って遷移し、800 nm帯の励起光に励起される場合には図1中のa''の経路を辿って遷移する。

# 【0040】

経路a'の場合は、基底準位( $^4I_{15/2}$ )のイオンは970 nm帯の励起光の2つの光子を吸収して、レーザ上準位( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ )へ励起される。このとき、基底準位とレーザ上準位との間のエネルギー差は970 nm帯の励起光の光子2つのエネルギーとほぼ等しく、イオンはエネルギー損失をほとんど伴わずに励起される。

# 【0041】

一方、経路a''の場合においても同様に、基底準位( $^4I_{15/2}$ )のイオンは、800 nm帯の励起光の2つの光子を吸収してレーザ上準位( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ )まで励起される。ただし、経路a''の場合には、基底準位( $^4I_{15/2}$ )のイオンは、1つの光子を吸収してレーザ下準位( $^4I_{9/2}$ )に励起された後、一旦、多フォノン緩和によって励起状態吸収下準位( $^4I_{13/2}$ )に緩和し、もう1つの800 nm帯励起光の光子を吸収して、レーザ上準位( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ )まで励起される。つまり、1つのイオンが基底準位( $^4I_{15/2}$ )からレーザ上準位( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ )に励起されるときには、 $^4I_{9/2}$ と $^4I_{13/2}$ との間のエネルギー差に応じたエネルギーが、多フォノン緩和により熱として失われる。800 nm帯励起光の光子2つ分のエネルギーと、上述の多フォノン緩和により熱として失

われるエネルギーを計算すると、800 nm帯励起光の光子が有するエネルギーのうちの約24%程度が熱として失われると考えられる。

#### 【0042】

上述の理由から、励起光のエネルギー損失をより少なくするためには、第1の励起手段として、800 nm帯の励起光を用いるより970 nm帯、530 nm帯の励起光を用いる方が好ましい。

#### 【0043】

また、上述の励起光のエネルギー損失を念頭においた上で、なお、第1の励起手段として800 nm帯の励起光を用いる場合もあり得る。このとき第1の励起手段の波長に好ましい範囲が存在する。

#### 【0044】

図3は、800 nm帯の励起光の波長とエルビウムイオンの吸収断面積との関係を示すグラフである。同図において、「基底状態吸収」は図1中の経路a'の左側点線が示す遷移である $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 遷移を意味し、「励起状態吸収」は図1中の経路a'の右側点線が示す遷移である $^4I_{13/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$ 遷移を意味している。

#### 【0045】

上記800 nm帯基底状態吸収遷移( $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 遷移)と、800 nm帯励起状態吸収遷移( $^4I_{13/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$ 遷移)との二段階の遷移(アップコンバージョン遷移)によりエルビウムイオンを基底準位からレーザ上準位に励起する場合、励起波長として、基底状態吸収断面積の値と励起状態吸収断面積の値が適切となる波長を選択する必要がある。これは、どちらか一方の断面積だけが大きく、もう一方の断面積が小さすぎると、高効率でアップコンバージョン励起を行うことができないためである。

#### 【0046】

図4は、800 nm帯励起におけるレーザ上準位励起効率を示すグラフである。このグラフは、図3に示した吸収断面積を用いて励起レーザの波長に対するレーザ上準位励起効率( $N_u/N_{total}$ )を計算することによって得られる。ここで、「 $N_u$ 」は増幅ファイバ1中のエルビウムイオンのうち、レーザ上準位に存在

するイオンの数であり、「 $N_{total}$ 」は増幅ファイバ 1 中に含まれるエルビウムイオンの総数である。なお、上記のレーザ上準位励起効率 ( $N_u/N_{total}$ ) は、増幅ファイバ 1 中のエルビウムイオン濃度が 2 0 0 0 p p m で、ファイバ長さが 5 . 2 m である増幅ファイバ 1 に対して、各波長で 1 0 0 m W の光パワーで励起したとして計算した。

## 【 0 0 4 7 】

この計算によれば、第 1 の励起手段として 8 0 0 n m 帯の励起光を用いたときに、高い効率でレーザ上準位にイオンを励起することができるのは励起光の波長が 7 9 5 ~ 8 0 5 n m であり、この中でも最大効率でレーザ上準位にイオンを励起することができるのは励起光の波長が 8 0 1 n m となる。

## 【 0 0 4 8 】

次に、第 2 の励起手段で用いる励起光の波長の好ましい範囲について説明する。

## 【 0 0 4 9 】

図 1 の b、b'、b'' は、第 2 の励起手段で用いる励起光の波長により、励起状態吸収下準位 ( $^4I_{13/2}$ ) のイオンがレーザ上準位 ( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ ) へ励起される経路を示している。8 5 0 n m 帯の励起光に励起される場合には図 1 中の b の経路を辿って遷移し、8 0 0 n m 帯の励起光に励起される場合には図 1 中の b' の経路を辿って遷移し、7 2 0 n m 帯の励起光に励起される場合には図 1 中の b'' の経路を辿って遷移する。

## 【 0 0 5 0 】

ここで、7 2 0 n m 帯の励起光を用いる経路 b'' の場合、励起状態吸収下準位 ( $^4I_{13/2}$ ) のイオンは、レーザ上準位 ( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ ) より上の準位  $^4F_{7/2}$  に励起され、フォノン緩和によりエネルギーを失ってレーザ上準位 ( $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ ) に到達することになる。したがって、励起光のエネルギー損失をより少なくするためには、第 2 の励起手段として、7 2 0 n m 帯の励起光を用いるより 8 5 0 n m 帯、8 0 0 n m 帯の励起光を用いる方が好ましい。

## 【 0 0 5 1 】

さらに、第 2 の励起手段に用いる励起光の波長として、励起状態吸収断面積が

大きく、基底状態吸収断面積は逆に小さい波長を選択することでレーザパワーを効率よく励起状態吸収に用いることが可能となる。したがってこの場合は、図3に示すように、第2の励起手段として用いるレーザ光の波長を785nm付近(780~790nm)とすることが望ましい。

## 【0052】

上記、第1の励起手段に用いる530nm帯(510~550nm)、800nm帯(780~810nm)、970nm帯(960~985nm)、第2の励起手段として用いる720nm帯(710~730nm)、800nm帯(780~810nm)、850nm帯(830~870nm)のレーザ光源としては、半導体レーザや固体レーザ、気体レーザ等によって得ることができる。

## 【0053】

その中でも、現在、ファイバーアンプの励起用光源として主流となっている半導体レーザは、他のレーザ光源と比較して励起光源の高効率化、小型化、長寿命化、およびレーザ出力の安定化を図ることができ、これによりレーザ増幅器の高効率化、小型化、長寿命化、およびレーザ出力の安定化が得られるというメリットがある。

## 【0054】

また、図5に、図2に示すレーザ増幅器の構成で、励起光源2(970nm)、励起光源4(789nm)の出力パワーをそれぞれ37mW、180mWとし、信号光源10を、出力を-35dBmで、波長1630~1660nmの範囲で掃引して利得と雑音指数を測定した結果を示す。図5のように信号光波長1660nmにおいて利得が4dBで、雑音指数が3dBである、利得・雑音指数スペクトルが得られた。このとき、 $FOM = D \cdot L / (S \cdot P)$ とすると、FOMは約3である。ここで、Dは増幅媒体である増幅ファイバ1に添加されるエルビウムイオンの濃度(ppm)であり、Lは増幅ファイバ1と励起光との相互作用長(m)であり、Sは増幅ファイバ1と励起光との相互作用断面積( $\mu m^2$ )であり、Pは増幅ファイバ1に入射される励起光の合計パワー(mW)である。

## 【0055】

図6は、図2に示したレーザ増幅器において、第2の励起光源の出力パワーを

変化させることで生じる FOM の変化に対する利得を測定した結果を示すグラフである。図 6 によれば、FOM が 1 以下および 10 以上では利得が大きく減少し、最適の FOM はおよそ 3 であることが分かる。

## 【 0 0 5 6 】

なお、図 2 に示すレーザ増幅器は、第 1 および第 2 の励起光源 2, 4 からそれぞれ出射される励起光が、両方とも信号光と同一の方向に増幅ファイバ 1 中を伝搬する前方励起の構成を有しているが、本実施形態によるレーザ増幅器の構成はこれに限られず、これらの励起光の両方、もしくはどちらか一方が、信号光と逆方向に伝搬する後方励起の構成であってもよい。あるいは、本実施形態によるレーザ増幅器は、これらの励起光の両方、もしくはどちらか一方が信号光と同一の方向および逆方向の双方向に伝搬する、双方向励起の構成であってもよい。

## 【 0 0 5 7 】

(第 2 の実施形態)

図 7 は、本発明の第 2 の実施形態に係るレーザ増幅器を示す概略構成図である。

## 【 0 0 5 8 】

図 7 に示すように、本実施形態のレーザ増幅器は、信号光を出射する信号光源 10 と、第 1 の励起光源 2 から出射されたレーザ光をその信号光に合波させる第 1 の波長多重合波器 3 と、その信号光に、第 2 の励起光源 4 から出射されたレーザ光をさらに合波させる第 2 の波長多重合波器 5 と、その信号光を増幅させる増幅ファイバ 1 とを有している。さらに、このレーザ増幅器は、増幅ファイバ 1 から出射された信号光に第 1 の励起光源 2' から出射されたレーザ光を合波させる第 1 の波長多重合波器 3' と、その信号光に、第 2 の励起光源 4' から出射されたレーザ光をさらに合波させる第 2 の波長多重合波器 5' と、その信号光を増幅させる増幅ファイバ 1' とを有している。

## 【 0 0 5 9 】

信号光源 10 は、出射する信号光の波長が可変である。また、信号光源 10 と第 1 の波長多重合波器 3 との間と、増幅ファイバ 1' の出射端側には、戻り光による意図しないレーザ発振を抑制するために光アイソレータ 8 がそれぞれ設けら

れている。

#### 【0060】

このように、本実施形態のレーザ増幅器は、信号光増幅の高利得化および高効率化を図るために複数の増幅ファイバ1, 1' が連続して接続されており、さらに、各増幅ファイバ1, 1' に入射する信号光に十分な励起光パワーを与えるために、複数の励起光源2, 4, 2', 4' からそれぞれ出射される励起光が各増幅ファイバ1, 1' に入射する信号光にそれぞれ合波されるように構成されている。

#### 【0061】

励起光源からある一定のパワーを有する励起光が与えられるときに、増幅ファイバの長さを変えていくと、増幅ファイバがある長さのときに利得が最大となり、増幅ファイバをそれよりも長くしたとしても、利得は逆に減少する。通常は、1つの励起光源から得られる励起光のパワーは有限であり、増幅ファイバの長さに応じて励起光のパワーを増加させることには限界がある。そこで本実施形態のように、励起光源と、励起光源から得られる励起光のパワーに対して利得が最大になる長さを有する増幅ファイバと、信号光源10からの信号光と励起光源からの励起光とを合波させる波長多重合波器とからなる増幅ユニットを多段に接続することにより、励起光パワーを無駄なく活用して信号光を段階的に増幅することができ、高利得化および高効率化を図ることができる。

#### 【0062】

なお、図7に示すレーザ増幅器は、励起光源2, 4、波長多重合波器3, 5、および増幅ファイバ1を含む第1の増幅ユニットと、励起光源2', 4'、波長多重合波器3', 5'、および増幅ファイバ1'を含む第2の増幅ユニットとの2段の増幅ユニットが連続して設置された構成を有しているが、増幅ユニットの段数はこれに限定されるものではなく、さらに多くの増幅ユニットが設置されていてもよい。

#### 【0063】

増幅ファイバ1は、エルビウム添加濃度が2000ppm、コア径が4.4μm、長さが3.2mのエルビウム添加フッ化物ガラスファイバからなり、増幅フ

ファイバ 1' は、エルビウム添加濃度が 2 0 0 0 p p m、コア径が 4 . 4  $\mu$  m、長さが 5 . 2 m のエルビウム添加フッ化物ガラスファイバ 1 からなる。また、第 1 の励起光源 2 , 2' には波長 9 7 0 n m 帯 ( 9 6 0 ~ 9 8 5 n m ) のレーザ光を出射する半導体レーザを用い、第 2 の励起光源 4 , 4' には波長 8 0 0 n m 帯 ( 7 8 0 ~ 7 9 0 n m ) のレーザ光を出射するチタンサファイアレーザを用いた。

## 【 0 0 6 4 】

第 1 の励起光源の波長帯、第 2 の励起光源の波長帯については、上記の例に限られるものではなく、第 1 の実施形態で開示された第 1 の励起光源の波長帯、第 2 の励起光源の波長帯を用いることもできる。

## 【 0 0 6 5 】

上記のように構成されたレーザ増幅器では、信号光源 1 0 から出射された信号光は、第 1 および第 2 の励起光源 2 , 4 からそれぞれ出射されたレーザ光 ( 励起光 ) が第 1 および第 2 の波長多重合波器 3 , 5 によってそれぞれ合波されて、増幅ファイバ 1 に入射する。さらに、増幅ファイバ 1 で増幅された信号光に、第 1 および第 2 の励起光源 2' , 4' からそれぞれ出射されたレーザ光 ( 励起光 ) が第 1 および第 2 の波長多重合波器 3' , 5' によってそれぞれ合波されて、増幅ファイバ 1' に入射する。

## 【 0 0 6 6 】

第 1 の励起光源 2 , 2' の出力パワーを 3 7 m W、第 2 の励起光源 4 , 4' の出力パワーを 1 8 0 m W とし、信号光源 1 0 から出射される信号光の波長を 1 6 6 0 n m、出力を 0 d B m としたとき、得られた利得は 1 3 d B で、光 / 光変換効率は約 1 0 % であった。

## 【 0 0 6 7 】

なお、図 7 に示すレーザ増幅器は、第 1 の励起光源 2 , 2' から出射されるレーザ光と、第 2 の励起光源 4 , 4' から出射されるレーザ光とが、両方とも信号光と同一の方向に増幅ファイバ 1 , 1' 中を伝搬する前方励起の構成を有しているが、本実施形態によるレーザ増幅器の構成はこれに限られず、これらのレーザ光の両方、もしくはどちらか一方が、信号光と逆方向に伝搬する後方励起の構成であってもよい。あるいは、本実施形態によるレーザ増幅器は、これらのレーザ

光の両方、もしくはどちらか一方が信号光と同一の方向および逆方向の双方向に伝搬する、双方向励起の構成であってもよい。

## 【 0 0 6 8 】

また、上記では第1の励起光源2, 2'は波長970nm帯(960~985nm)のレーザ光を出射する構成について説明したが、第1の励起光源2, 2'の各々が出射するレーザ光の波長は共に同一であってもよいし、あるいは、上記の波長範囲(960~985nm)内にある限りにおいて互いに異なってもよい。同様に、上記では第2の励起光源4, 4'は波長800nm帯(780~790nm)のレーザ光を出射する構成について説明したが、第2の励起光源4, 4'の各々が出射するレーザ光の波長は共に同一であってもよいし、あるいは、上記の波長範囲(780~790nm)内にある限りにおいて互いに異なってもよい。

## 【 0 0 6 9 】

## (第3の実施形態)

図8は、本発明の第3の実施形態に係るレーザ増幅器を示す概略構成図である。

## 【 0 0 7 0 】

図8に示す本実施形態のレーザ増幅器も、図7に示したレーザ増幅器と同様に、信号光を出射する信号光源10と、第1の励起光源2から出射されたレーザ光をその信号光に合波させる第1の波長多重合波器3と、その信号光に、第2の励起光源4から出射されたレーザ光をさらに合波させる第2の波長多重合波器5と、その信号光を増幅させる増幅ファイバ1とを有し、さらに、このレーザ増幅器は、増幅ファイバ1から出射された信号光に第1の励起光源2'から出射されたレーザ光を合波させる第1の波長多重合波器3'と、その信号光に、第2の励起光源4'から出射されたレーザ光をさらに合波させる第2の波長多重合波器5'と、その信号光を増幅させる増幅ファイバ1'とを有している。

## 【 0 0 7 1 】

ただし、本実施形態のレーザ増幅器は、増幅ファイバ1と第1の波長多重合波器3'との間に、波長820~860nmの光に対する透過率が0.1%以下で



ある素子としてフィルタ 9 が配置されている。

#### 【 0 0 7 2 】

信号光源 1 0 は、出射する信号光の波長が可変である。また、信号光源 1 0 と第 1 の波長多重合波器 3 との間と、増幅ファイバ 1' の出射端側には、戻り光による意図しないレーザ発振を抑制するために光アイソレータ 8 がそれぞれ設けられている。

#### 【 0 0 7 3 】

このように、本実施形態のレーザ増幅器は、信号光増幅の高利得化および高効率化を図るために複数の増幅ファイバ 1, 1' が連続して接続されており、さらに、各増幅ファイバ 1, 1' に入射する信号光に十分な励起光パワーを与えるために、複数の励起光源 2, 4, 2', 4' からそれぞれ出射される励起光が各増幅ファイバ 1, 1' に入射する信号光にそれぞれ合波されるように構成されており、さらに、上記のようにフィルタ 9 が設けられていることにより、850nm 帯の ASE が抑制されるようになっている。

#### 【 0 0 7 4 】

励起光源から十分な励起光量が得られる場合には、その光量に合わせて増幅ファイバ 1, 1' の長さを長くすることが可能である。しかし、増幅ファイバ 1, 1' の長さを長くすれば、それに応じて ASE 光（増幅自然放出光）のパワーも増大し、信号光による誘導放出がそのような ASE 光によって抑制されることから、光増幅器は高利得を得られなくなる。さらに、励起光のパワーが ASE 光のパワーへと変換されてしまうため、励起光から信号光へのエネルギーの変換効率が低下してしまう。

#### 【 0 0 7 5 】

本発明に係る光増幅器では、光増幅に用いる誘導放出遷移である ( ${}^4S_{3/2}, {}^2H_{11/2}) \rightarrow {}^4I_{9/2}$  遷移に対して  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  遷移が競合し、 ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  遷移による波長 850nm 帯の自然放出光が、目的とする波長 1650nm 光の増幅を抑制して、利得とエネルギー変換効率を低下させてしまう。そこで、本実施形態のように、望ましくない ASE 光を遮断するフィルタ 9 を各増幅ファイバ 1, 1' の間に設置することにより、ASE 光が次段の増幅ファイバ 1' で過剰

に増幅されることを防止し、レーザ増幅器の高利得化とエネルギー変換効率の高効率化を図ることが可能になる。

## 【 0 0 7 6 】

なお、このフィルタ 9 に代えて光アイソレータ 8 を各増幅ファイバ 1, 1' の間に設置することによっても、信号光と逆の方向に伝搬する A S E 光が前段（1 段目）の増幅ファイバ 1 に入射することを防止できるため、上記のようにフィルタ 9 を設置した場合と同様の効果を得ることができる。

## 【 0 0 7 7 】

本実施形態では、増幅ファイバ 1 は、エルビウムイオン濃度が 2 0 0 0 p p m、コア径が 4. 4  $\mu$  m、長さが 3. 2 m であり、増幅ファイバ 1' は、エルビウムイオン濃度が 2 0 0 0 p p m、コア径が 4. 4  $\mu$  m、長さが 5. 2 m である。また、第 1 の励起光源 2, 2' には波長 9 7 0 n m 帯（9 6 0 ~ 9 8 5 n m）のレーザ光（励起光）を出射する半導体レーザを用い、第 2 の励起光源 4, 4' には波長 8 0 0 n m 帯（7 8 0 ~ 7 9 0 n m）のレーザ光（励起光）を出射するチタンサファイアレーザを用いた。

## 【 0 0 7 8 】

第 1 の励起光源の波長帯、第 2 の励起光源の波長帯については、上記の例に限られるものではなく、第 1 の実施形態で開示された第 1 の励起光源の波長帯、第 2 の励起光源の波長帯も用いることができる。

## 【 0 0 7 9 】

上記のように構成されたレーザ増幅器では、信号光源 1 0 から出射された信号光は、第 1 および第 2 の励起光源 2, 4 からそれぞれ出射されたレーザ光（励起光）が第 1 および第 2 の波長多重合波器 3, 5 によってそれぞれ合波されて、増幅ファイバ 1 に入射する。さらに、増幅ファイバ 1 で増幅された信号光は、フィルタ 9 を通過した後に、第 1 および第 2 の励起光源 2', 4' からそれぞれ出射されたレーザ光（励起光）が第 1 および第 2 の波長多重合波器 3', 5' によってそれぞれ合波されて、増幅ファイバ 1' に入射する。

## 【 0 0 8 0 】

第 1 の励起光源 2, 2' の出力パワーを 3 7 mW、第 2 の励起光源 4, 4' の

出力パワーを 1 8 0 mW とし、信号光源 1 0 から出射される信号光の波長を 1 6 6 0 n m、出力を 0 d B m としたとき、得られた利得は 1 6 d B で、光／光変換効率は約 1 7 % であった。このように、本実施形態のレーザ増幅器は、本実施形態のレーザ増幅器からフィルタ 9 を除いた構成である図 6 のレーザ増幅器と比較して、利得および光／光変換効率が向上している。これは、フィルタ 9 によって 8 5 0 n m 帯の A S E を抑制したことにより、 $(^4S_{3/2}, ^2H_{11/2}) \rightarrow ^4I_{9/2}$  誘導放出遷移が、 $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  誘導放出遷移に対して優勢となり、 $(^4S_{3/2}, ^2H_{11/2})$  準位に蓄えられたエネルギーが、信号光のエネルギーへと高効率に変換されたためである。

## 【 0 0 8 1 】

なお、図 8 に示すレーザ増幅器は、第 1 の励起光源 2, 2' から出射される励起光と、第 2 の励起光源 4, 4' から出射される励起光とが、両方とも信号光と同一の方向に増幅ファイバ 1, 1' 中を伝搬する前方励起の構成を有しているが、本実施形態によるレーザ増幅器の構成はこれに限られず、これらの励起光の両方、もしくはどちらか一方が、信号光と逆方向に伝搬する後方励起の構成であってもよい。あるいは、本実施形態によるレーザ増幅器は、これらの励起光の両方、もしくはどちらか一方が信号光と同一の方向および逆方向の双方向に伝搬する、双方向励起の構成であってもよい。

## 【 0 0 8 2 】

さらに、図 8 に示すレーザ増幅器は、励起光源 2, 4、波長多重合波器 3, 5、および増幅ファイバ 1 を含む第 1 の増幅ユニットと、励起光源 2', 4'、波長多重合波器 3', 5'、および増幅ファイバ 1' を含む第 2 の増幅ユニットとの 2 段の増幅ユニットが連続して設置された構成を有しているが、増幅ユニットの段数はこれに限定されるものではなく、さらに多くの増幅ユニットが設置されていてもよい。

## 【 0 0 8 3 】

また、上述したように  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  遷移によって波長 5 5 0 n m 帯の自然放出光も放射されるため、フィルタ 9 は波長 5 0 0 ~ 5 6 0 n m の光をカットするものであってもよく、さらには波長 5 0 0 ~ 5 6 0 n m の光と波長 8 2 0 ~ 8

60 nmの光との両方をカットするものであることが好ましい。あるいは、フィルタ9は、磁気光学結晶としてイットリウム鉄ガーネット結晶（YIG結晶）を用いた光アイソレータなどの、1650 nm帯の光を透過し、波長500～560 nmと波長820～860 nmの両方の光をカットする特性を有する素子によっても代用可能である。

## 【0084】

（第4の実施形態）

図9は、本発明の第4の実施形態に係るレーザ増幅器を示す概略構成図である。

## 【0085】

図9に示すように、本実施形態のレーザ増幅器は、信号光を出射する信号光源10と、第1の励起光源2から出射されたレーザ光をその信号光に合波させる第1の波長多重合波器3と、その信号光に、第2の励起光源4から出射されたレーザ光をさらに合波させる第2の波長多重合波器5と、さらにその信号光に、利得増強光光源6から出射されたレーザ光を合波させる第3の波長多重合波器7と、信号光を増幅させる増幅ファイバ1とを有している。

## 【0086】

信号光源10は、出射する信号光の波長が可変である。また、信号光源10と第1の波長多重合波器3との間と、増幅ファイバ1の出射端側には、戻り光による意図しないレーザ発振を抑制するために光アイソレータ8がそれぞれ設けられている。増幅ファイバ1は、エルビウムイオン濃度が2000 ppm、コア径が4.4 μm、長さが5.2 mである。また、第1の励起光源2には波長970 nm帯（960～985 nm）のレーザ光を出射する半導体レーザを用い、第2の励起光源4には波長800 nm帯（780～790 nm）のレーザ光を出射するチタンサファイアレーザを用い、利得増強光光源6には波長841 nmのレーザ光を出射する半導体レーザを用いた。

## 【0087】

第1の励起光源の波長帯、第2の励起光源の波長帯については、上記の例に限られるものではなく、第1の実施形態で開示された第1の励起光源の波長帯、第

2の励起光源の波長帯を用いることもできる。

【0088】

図10は、エルビウムイオンの $^4S_{3/2}$ 準位と $^4I_{13/2}$ 準位との間の蛍光・吸収断面積を模式的に示すグラフである。波長841nmにおける $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 遷移断面積を $s_1$  (cm<sup>2</sup>) とし、 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$ 遷移断面積を $s_2$  (cm<sup>2</sup>) としたとき、その比 $s_1/s_2$ は、約0.55である。

【0089】

図11に示すグラフは、利得増強光を用いない場合の光／光変換効率で規格化した光／光変換効率を示している。このグラフによると、最も光／光変換効率が改善される $s_1/s_2$ の最適値は約0.72であり、このときの光の波長は845nmである。同じく図11のグラフより、 $s_1/s_2$ の範囲が0.2以上2.2以下であるときに、利得増強光を入射させない場合に比べて光／光変換効率が1.5倍以上になることがわかる。

【0090】

上記のように構成されたレーザ増幅器では、信号光源10から出射された信号光は、第1および第2の励起光源2, 4からそれぞれ出射されたレーザ光（励起光）が第1および第2の波長多重合波器3, 5によってそれぞれ合波され、さらにその信号光に、利得増強光光源6から出射された利得増強光が第3の波長多重合波器7によって合波されて、増幅ファイバ1に入射する。

【0091】

第1の励起光源2の出力パワーを37mW、第2の励起光源4の出力パワーを180mW、利得増強光光源6の出力パワーを1mWとし、信号光源10から出射される信号光の波長を1660nm、出力を-5dBmとしたとき、得られた利得は23dBで、光／光変換効率は約28%であった。

【0092】

なお、図9に示すレーザ増幅器は、第1の励起光源2から出射される励起光と、第2の励起光源4から出射される励起光とが、両方とも信号光と同一の方向に増幅ファイバ1中を伝搬する前方励起の構成を有しているが、本実施形態によるレーザ増幅器の構成はこれに限られず、これらの励起光の両方、もしくはどちら

か一方が、信号光と逆方向に伝搬する後方励起の構成であってもよい。あるいは、本実施形態によるレーザ増幅器は、これらの励起光の両方、もしくはどちらか一方が信号光と同一の方向および逆方向の双方向に伝搬する、双方向励起の構成であってもよい。

## 【 0 0 9 3 】

(第 5 の実施形態)

図 1 2 は、本発明の光ファイバレーザの一実施形態を示す概略構成図である。

## 【 0 0 9 4 】

本実施形態に係る光ファイバレーザは、エルビウムイオン添加濃度が 2 0 0 0 p p m、コア径が 4 . 4  $\mu$  m、長さが 5 . 2 m である増幅ファイバ 1 と、増幅ファイバ 1 を励起する波長 9 7 0 n m 帯 ( 9 6 0 ~ 9 8 5 n m ) のレーザ光を出射する半導体レーザからなる第 1 の励起光源 2 と、増幅ファイバ 1 を励起する波長 8 0 0 n m 帯 ( 7 8 0 ~ 7 9 0 n m ) のレーザ光を出射するチタンサファイアレーザからなる第 2 の励起光源 4 とを有している。

## 【 0 0 9 5 】

第 1 の励起光源 2 から出射された励起光は、レンズ 1 1 を通った後にダイクロイックミラー 1 3 で反射して、増幅ファイバ 1 の入射端に入射するようになっている。また、第 2 の励起光源 4 から出射された励起光は、レンズ 1 1 ' を通った後にダイクロイックミラー 1 3 を透過し、増幅ファイバ 1 の入射端に入射するようになっている。なお、これらのレンズ 1 1 , 1 1 ' は、励起光源 2 , 4 から出射された励起光を増幅ファイバ 1 の入射端に集光させるために用いられるものである。

## 【 0 0 9 6 】

さらに、増幅ファイバ 1 の入射端側には、励起光源 2 , 4 から出射される波長の光を透過し、発振波長帯 ( 1 6 5 0 n m 帯 ) の光を全反射するリアミラー 1 2 が設置されている。さらに、増幅ファイバ 1 の出射端側には、発振波長帯 ( 1 6 5 0 n m 帯 ) の光を部分反射する出力ミラー 1 2 ' が設置されている。

## 【 0 0 9 7 】

上記のように構成された光ファイバレーザによれば、励起光源 2 , 4 からそれ

ぞれ出射された励起光が、一旦自由空間に放射された後、それぞれレンズ 1 1, 1 1'、ダイクロイックミラー 1 3、およびリアミラー 1 2 を介して増幅ファイバ 1 に入射されると、増幅ファイバ 1 の出射端から 1 6 5 0 n m 帯のファイバレーザ出力光が出力される。

## 【 0 0 9 8 】

図 1 3 は、図 1 2 に示した構成の光ファイバレーザによって得られるレーザ発振スペクトルを示すグラフである。図 1 3 に示すように、図 1 2 に示した構成の光ファイバレーザによれば、1 6 5 1 n m において半値全幅が 2. 5 n m 程度のレーザ発振を得ることができた。

## 【 0 0 9 9 】

第 1 の励起光源の波長帯、第 2 の励起光源の波長帯については、上記の例に限られるものではなく、第 1 の実施形態で開示された第 1 の励起光源の波長帯、第 2 の励起光源の波長帯を用いることもできる。

## 【 0 1 0 0 】

(第 6 の実施形態)

図 1 4 は、本発明の光ファイバレーザの他の実施形態を示す概略構成図である。

## 【 0 1 0 1 】

本実施形態に係る光ファイバレーザは、図 1 2 に示した構成の光ファイバレーザの出力ミラー 1 2' に代えてコリメートレンズ 1 5 と回折格子が設けられている。本実施形態の光ファイバレーザのその他の構成は、図 1 2 に示した光ファイバレーザと同様である。

## 【 0 1 0 2 】

上記のように構成された光ファイバレーザによれば、励起光源 2, 4 からそれぞれ出射された励起光が、一旦自由空間に放射された後、それぞれレンズ 1 1, 1 1'、ダイクロイックミラー 1 3、およびリアミラー 1 2 を介して増幅ファイバ 1 に入射されることで、増幅ファイバ 1 の出射端から出力されたファイバレーザ出力光は、コリメートレンズ 1 5 によって平行光にされ、回折格子 1 6 によって反射される。回折格子 1 6 は、特定波長の光を選択的に反射するものであり、

コリメートレンズ 1 5 によって平行光にされた出力光に対する角度を変化させることによって、選択される波長を変えることができる。

### 【 0 1 0 3 】

図 1 5 は、図 1 4 に示した構成の光ファイバレーザによって得られるファイバレーザ出力光の波長 1. 6 5  $\mu$  m 近傍の波長可変幅を示すグラフである。図 1 5 に示すように、本実施形態の光ファイバレーザによれば、ファイバレーザ出力光を 5 n m 程度の可変幅で変化させることができた。なお、この可変幅は、光ファイバレーザの各構成要素のアライメント精度や、回折格子 1 6 の回折性能に大きく依存するため、それらを改善することでさらに広げることにも可能である。

### 【 0 1 0 4 】

#### 【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、増幅媒体に添加された希土類元素イオンを励起し、レーザ上準位とレーザ下準位との間に反転分布を形成する第 1 の励起手段と、第 1 の励起手段を構成する励起光の波長とは異なる波長を有する励起光によって励起状態吸収下準位に存在する希土類元素イオンをレーザ上準位もしくはレーザ上準位よりも上位の準位に励起する第 2 の励起手段とを有しているので、信号光が励起状態吸収下準位の希土類元素イオンによって吸収されるという信号光励起状態吸収（信号光 E S A）の発生が抑えられることから、信号光の増幅利得および増幅効率を高めることができる。

### 【 0 1 0 5 】

特に、希土類元素イオンとしてエルビウムイオンを用い、レーザ上準位が $^4S_{3/2}$ または $^2H_{11/2}$ であり、レーザ下準位が $^4I_{9/2}$ であり、励起状態吸収下準位が $^4I_{13/2}$ であるときに、第 1 の励起手段を構成する励起光の波長を 9 6 0 ~ 9 8 5 n m とし、第 2 の励起手段を構成する励起光の波長を 7 8 0 ~ 7 9 0 n m とするか、あるいは、第 1 の励起手段を構成する励起光の波長を 7 9 5 ~ 8 0 5 n m とし、第 2 の励起手段を構成する励起光の波長を 7 8 0 ~ 7 9 0 n m とすることにより、波長 1 6 5 0 n m 帯のレーザ光を良好に増幅することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【図 1】



エルビウムのエネギー準位図である。

【図 2】

本発明の第 1 の実施形態に係るレーザ増幅器を示す概略構成図である。

【図 3】

800nm 帯の励起光の波長とエルビウムイオンの吸収断面積との関係を示すグラフである。

【図 4】

800nm 帯励起レーザによるレーザ上準位励起効率を示すグラフである。

【図 5】

図 2 に示したレーザ増幅器による、信号光波長の利得・雑音指数スペクトルを示すグラフである。

【図 6】

図 2 に示したレーザ増幅器において、第 2 の励起光源の出力パワーを変化させることで生じる FOM の変化に対する利得を測定した結果を示すグラフである。

【図 7】

本発明の第 2 の実施形態に係るレーザ増幅器を示す概略構成図である。

【図 8】

本発明の第 3 の実施形態に係るレーザ増幅器を示す概略構成図である。

【図 9】

本発明の第 4 の実施形態に係るレーザ増幅器を示す概略構成図である。

【図 10】

エルビウムイオンの $^4S_{3/2}$ 準位と $^4I_{13/2}$ 準位との間の蛍光・吸収断面積を模式的に示すグラフである。

【図 11】

$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 遷移断面積  $s_1$  と  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$  遷移断面積  $s_2$  との比  $s_1/s_2$  と、光／光変換効率との関係を示すグラフである。

【図 12】

本発明の光ファイバレーザの一実施形態を示す概略構成図である。

【図 13】

図 1 2 に示した構成の光ファイバレーザによって得られるレーザ発振スペクトルを示すグラフである。

【図 1 4】

本発明の光ファイバレーザの他の実施形態を示す概略構成図である。

【図 1 5】

図 1 4 に示した構成の光ファイバレーザによって得られるファイバレーザ出力光の波長 1. 6 5  $\mu$  m 近傍の波長可変幅を示すグラフである。

【図 1 6】

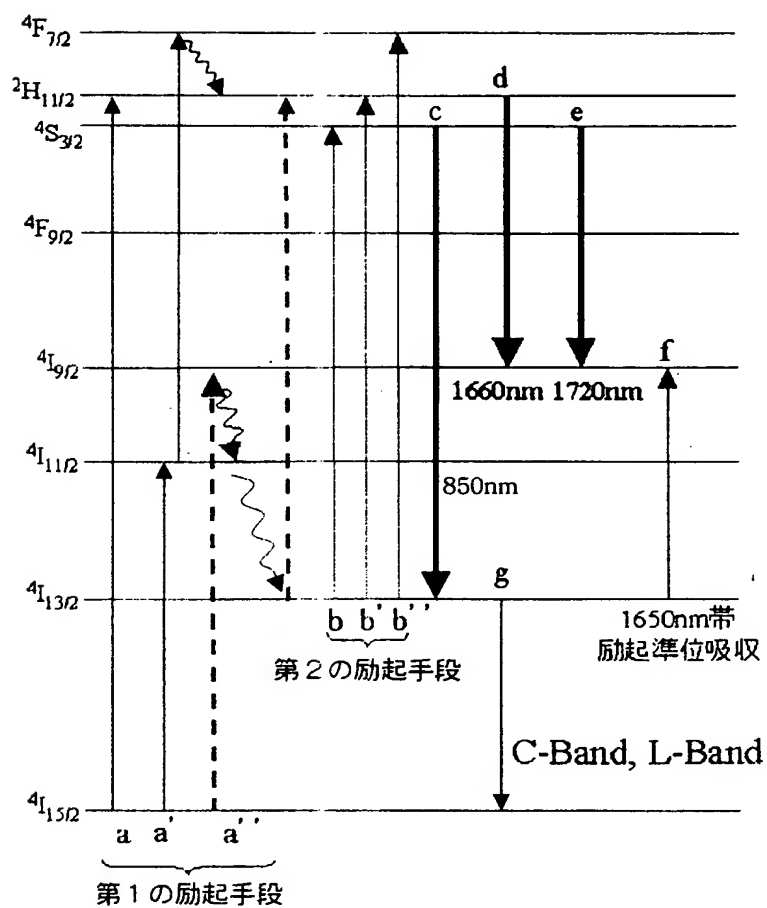
フッ化物ガラス中のエルビウムイオンの $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 遷移、あるいは $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 遷移による発光スペクトルを示すグラフである。

【符号の説明】

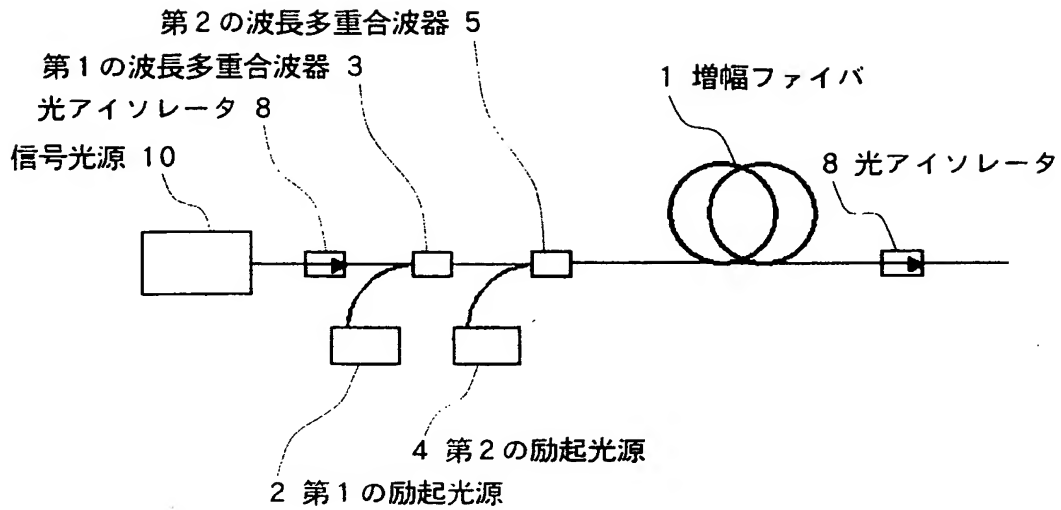
- 1, 1'      増幅ファイバ
- 2, 2'      励起光源（第 1 の励起光源）
- 3, 3'      波長多重合波器（第 1 の波長多重合波器）
- 4, 4'      第 2 の励起光源
- 5, 5'      第 2 の波長多重合波器
- 6      利得増幅光光源
- 7      第 3 の波長多重合波器
- 8      光アイソレータ
- 9      フィルタ
- 1 0      信号光源
- 1 1, 1 1'      レンズ
- 1 2      リアミラー
- 1 2'      出力ミラー
- 1 3      ダイクロイックミラー
- 1 4      ファイバレーザ光
- 1 5      コリメートレンズ
- 1 6      回折格子

【書類名】 図面

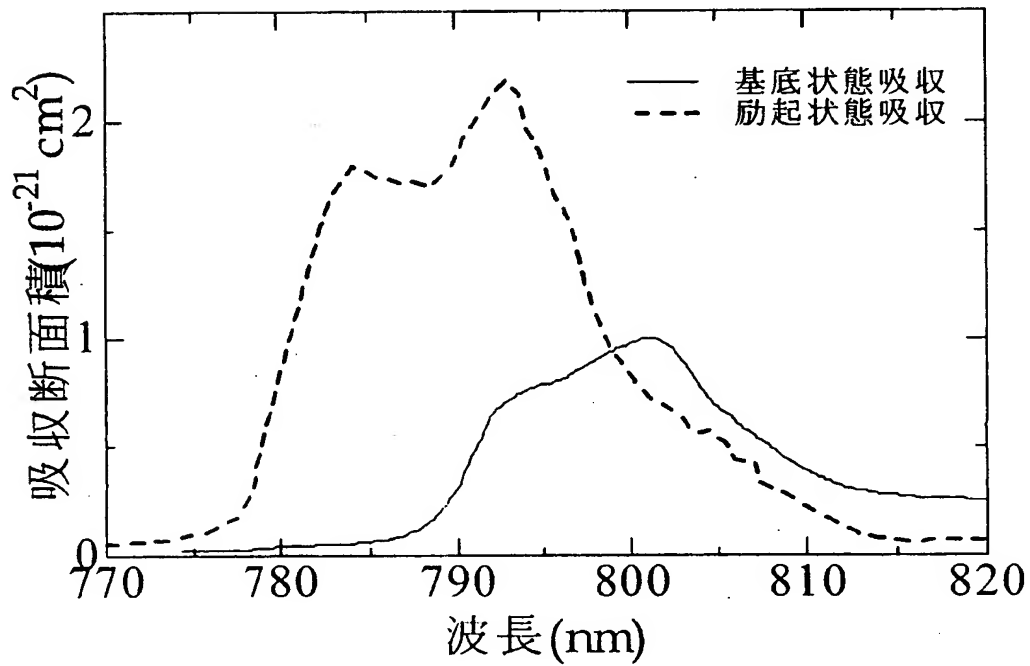
【図 1】



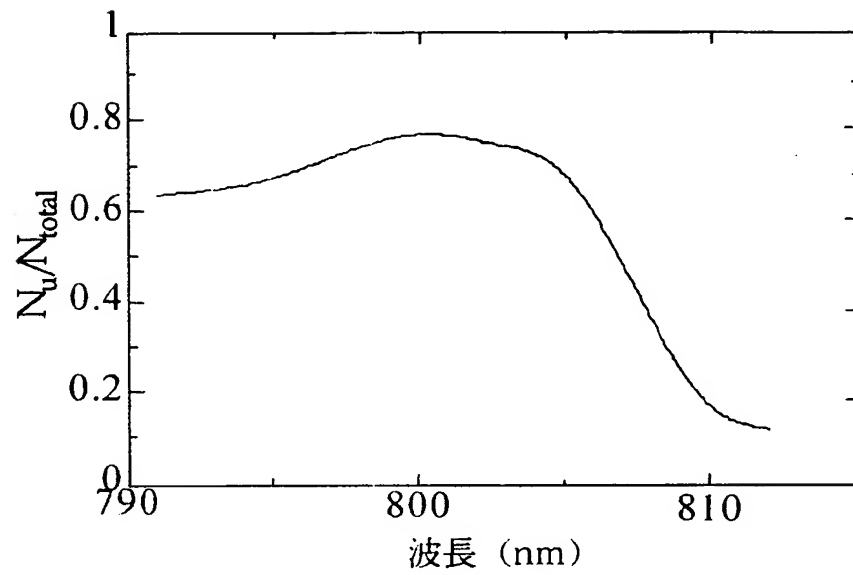
【図 2】



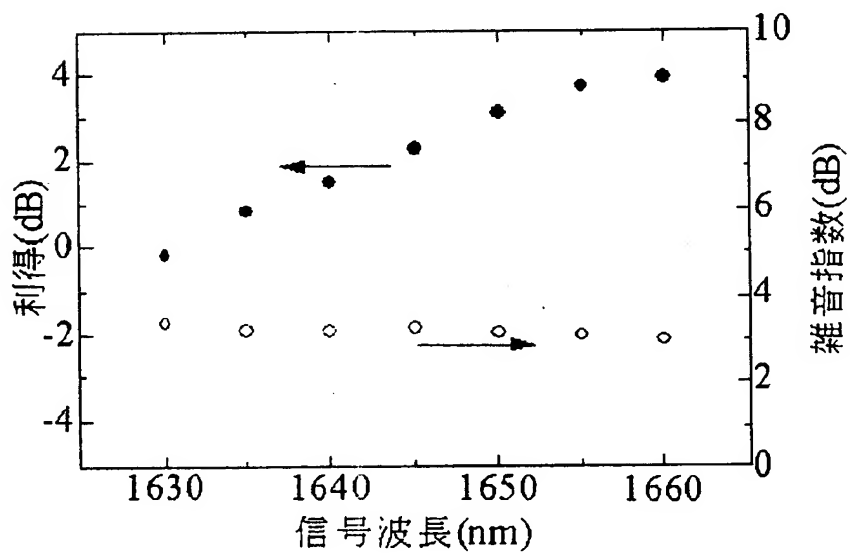
【図 3】



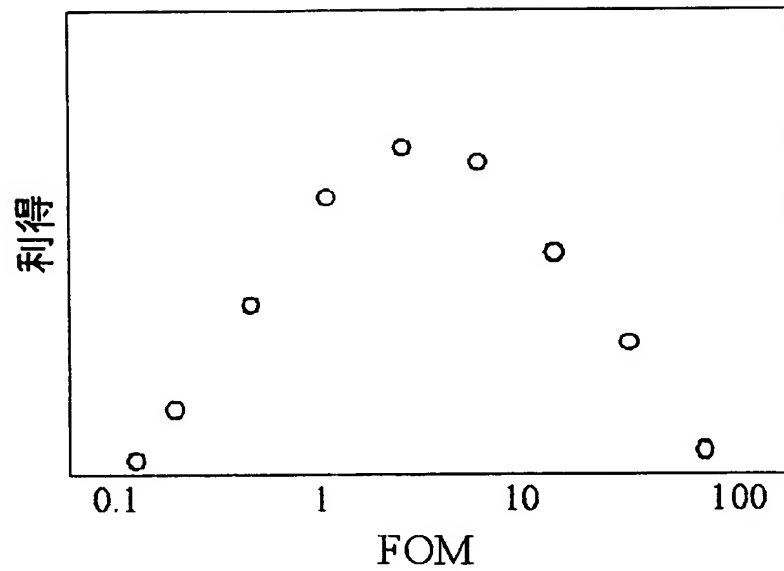
【図 4】



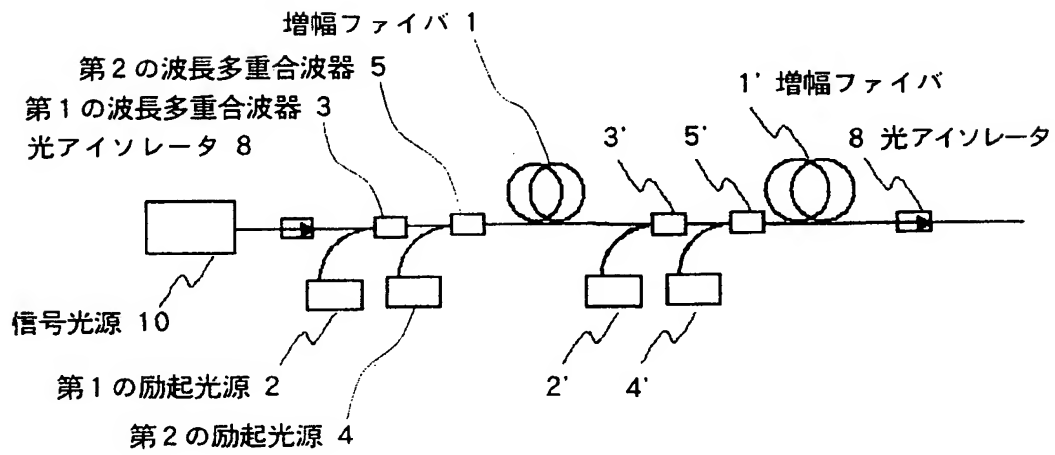
【図 5】



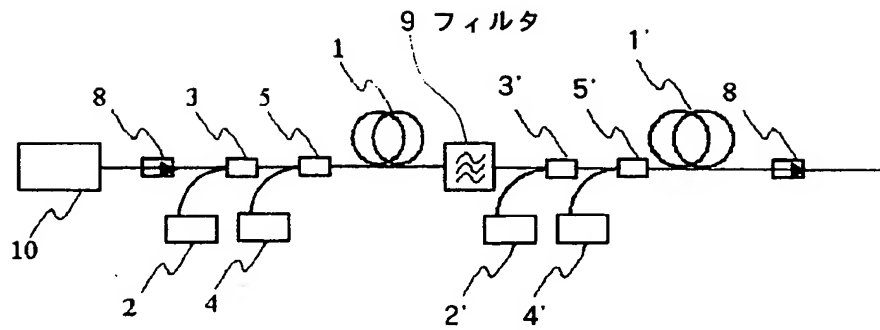
【図6】



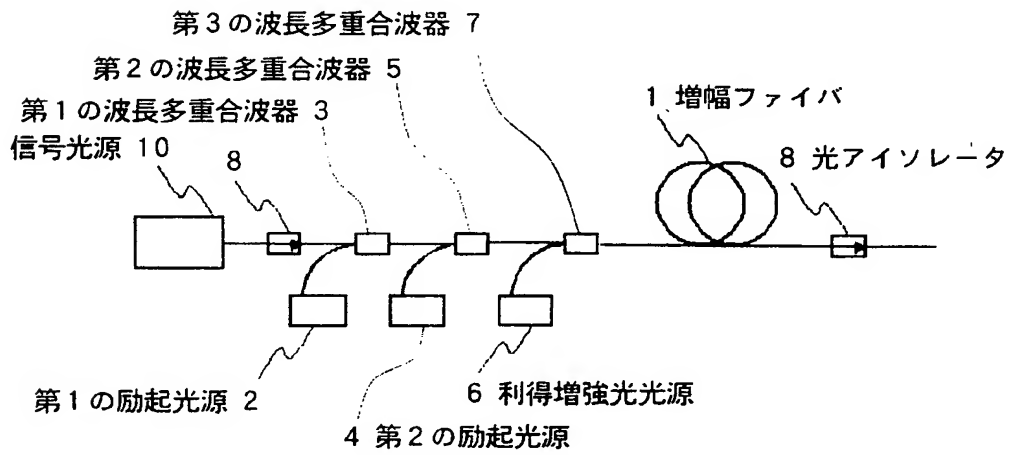
【図7】



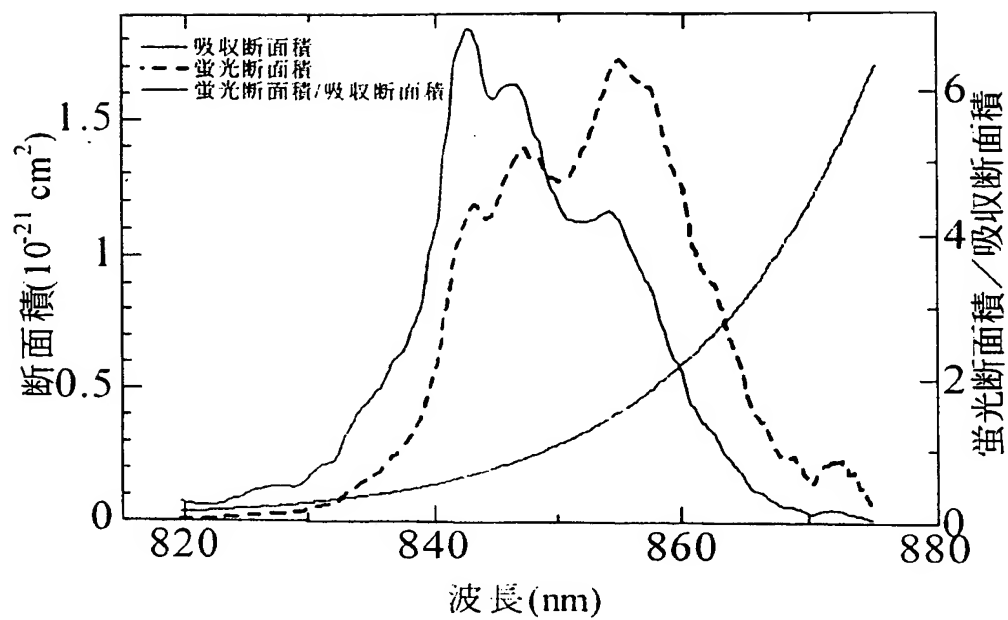
【図 8】



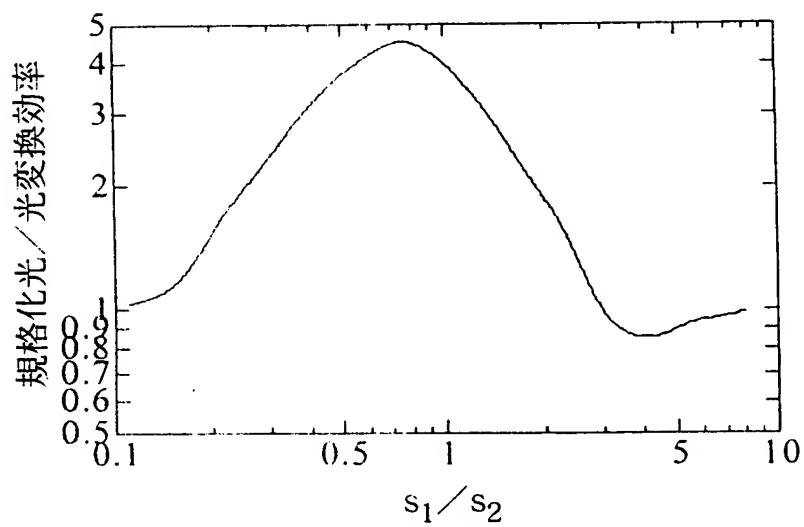
【図 9】



【図 10】

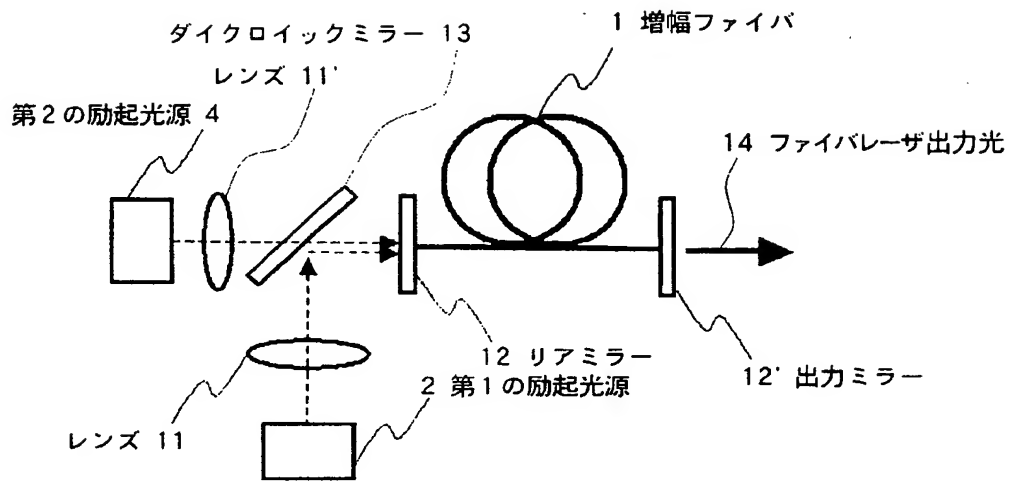


【図 11】

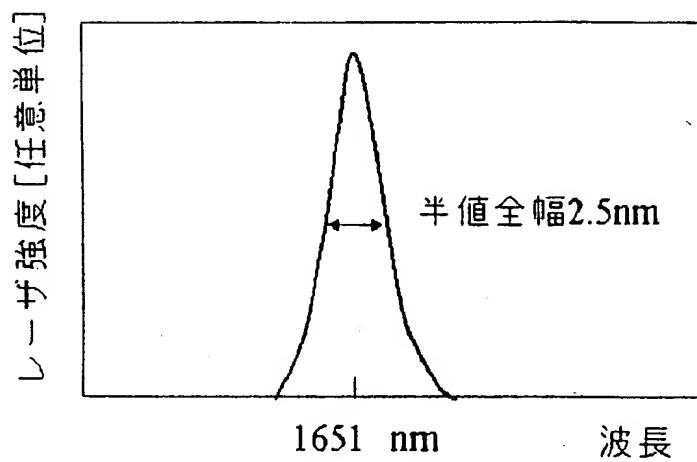




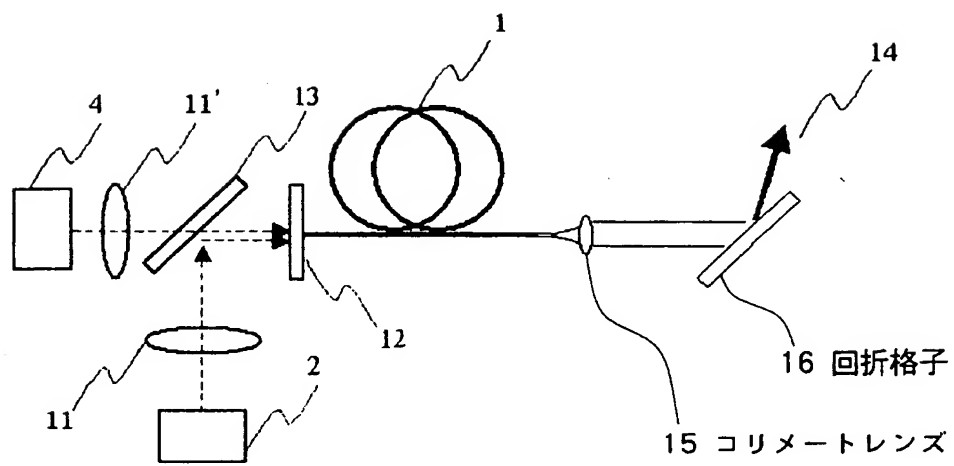
【図 1 2】



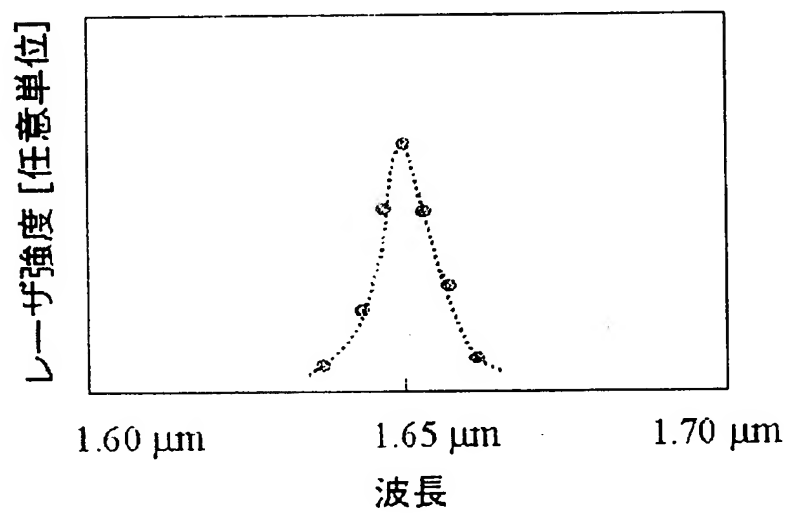
【図 1 3】



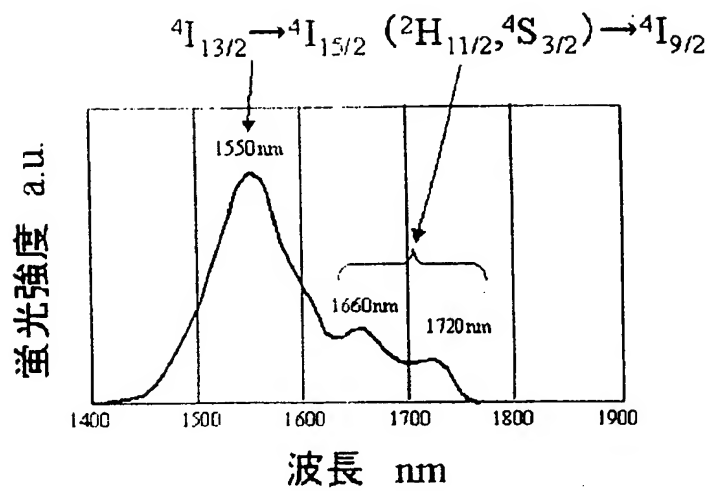
【図 14】



【図 15】



【図 16】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 信号光励起状態吸収の発生を抑え、信号光の増幅利得および増幅効率を高めることができるレーザ増幅器等を提供する。

【解決手段】 本発明のレーザ増幅器は、所定のエネルギー準位構造を有するエルビウムイオンが添加された増幅ファイバ（不図示）と、増幅ファイバに導入される励起光によって増幅ファイバに添加されたエルビウムイオンを励起し、レーザ上準位（ $^4S_{3/2}$ または $^2H_{11/2}$ ）とレーザ下準位（ $^4I_{9/2}$ ）との間に反転分布を形成する第1の励起手段と、増幅ファイバに導入される、第1の励起手段を構成する励起光の波長とは異なる波長を有する励起光によって、励起状態吸収下準位（ $^4I_{13/2}$ ）に存在するエルビウムイオンをレーザ上準位もしくはレーザ上準位よりも上位の準位に励起する第2の励起手段とを有している。

【選択図】 図1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [ 0 0 0 0 0 4 2 3 7 ]

1. 変更年月日	1 9 9 0 年 8 月 2 9 日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都港区芝五丁目 7 番 1 号
氏 名	日本電気株式会社